

## <Technical Report>

# 대륙별 운영 중 원자력발전소 부지의 설계기준지진 수준 현황

최호선

한국원자력안전기술원 원자력안전연구실

요 약

국내 원자력발전소는 부지선정, 설계, 건설 및 운영까지 단계별로 엄격한 기준에 따라 부지에서 발생할 수 있는 최대지진동에 견딜 수 있는 설계기준지진(Design Basis Earthquake)을 고려함으로써 지진재해에 대비하고 있다. 그런데, 국가별로 다른 용어와 기준으로 원자력시설 부지의 설계기준지진 수준을 사용하기 때문에, 이러한 차이점을 이해하는 것이 중요하다. 국가별로 다르게 사용되는 용어를 단순화하기 위해 대표용어로 설계기준지진을 사용하였으며, 국가들의 운영 중 원자력발전소 부지의 설계기준지진 수준과 평가내용을 대륙별로 선별하여 요약하였다. 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 그 지역의 지진활동도에 따라 결정된다. 설립대 인근에 위치하여 큰 규모의 지진이 자주 발생하는 일본이나 미국 서부의 경우 우리나라보다 설계기준지진 수준이 높지만, 우리나라와 지진활동도가 유사한 미국 중동부나 유럽과 비교할 때 국내 원자력발전소 설계기준지진 수준은 유사하거나 높은 것으로 확인되었다.

**주요어:** 설계기준지진, 운영 중 원자력발전소 부지, 지진활동도

**Hoseon Choi, 2021, Current status of design basis earthquake level for nuclear power plant sites in operation by continent. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 6, p. 865-874**

**ABSTRACT:** The nuclear power plant (NPP) sites in South Korea adapt the design basis earthquake (DBE) level with strict criteria considering site selection, design, construction, operation, and the maximum ground motions potentially occurring at the site to prevent seismic hazards. Since each country uses its own DBE level with a different term and criteria for the NPP site, understanding these differences between countries by continent is important. To simplify the different terms used in each county, the DBE is used as a representative term, and its own DBE level and assessment for the NPP sites in operation between countries by continent are summarized. The DBE level of NPP sites depends on seismic activity of their areas. Japan and western United States of America, where having more frequent and stronger earthquakes than South Korea, naturally have higher DBE levels. The DBE level of NPP sites in South Korea has been confirmed to be similar or higher compared to that of central and eastern Unites Sates of America and Europe etc, which have similar seismic activity.

**Key words:** design basis earthquake, nuclear power plant site in operation, seismic activity

(Hoseon Choi, Department of Nuclear Safety Research, Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon 34142, Republic of Korea)

## 1. 서 론

국내 원자력발전소는 부지선정, 설계, 건설 및 운영까지 단계별로 엄격한 규정에 따라 부지에서 발생할 수 있는 최대지진동에 견딜 수 있도록 설계되었고, 지진에 대한 충분한 대비체계를 갖추고 있다. 즉, 원자력발전소 설계에 부지 최대지진동을 고려함으

로써 지진안전성을 확보하고 있는 것이다. 원자력발전소 설계 및 운영의 기본 안전목표는 드물게 발생하는 지진을 포함하여, 발전소 수명 동안 발생가능한 발전소 계통, 구조물 및 기기의 오작동, 고장이 발생할 경우 사람과 환경을 보호하는 것이다. 지진은 지진동, 지표단층작용 등으로 부지 및 발전소에 복합적인 영향을 미친다. 또한 포행(creep), 슬립(slip),

‡ Corresponding author: +82-42-868-0674, E-mail: [hoseon@kins.re.kr](mailto:hoseon@kins.re.kr)

용기 및 침하와 같이 발전소 안전에 영향을 미칠 수 있는 지체구조적 환경과 관련된 현상도 있다. 지진은 중대사고를 관리하는 시스템을 포함하여 안전에 중요한 모든 품목에 동시에 영향을 미치는 외부재해이다(Katona, 2017).

설계기준지진(Design Basis Earthquake)은 원자력안전규정이 요구하는 기본 안전기능을 보장하고 산업기준에 부합하는 계통, 구조물 및 기기의 설계에 사용되는 지진이다(Katona, 2017). 운전기준지진(Operating Basis Earthquake)은 지속적인 안전운전에 필요한 계통, 구조물 및 기기가 기능을 유지하는 지진이지만, 이 연구에서 별도로 다루지 않았다. 한편, 설계기준지진과 그 의미가 유사하지만, 국가별로 다른 용어를 사용하기도 한다. 예를 들어, 안전정지지진(Safety Shutdown Earthquake), 설계지진(Design Earthquake), 지진수준-2(Seismic Level 2, SL-2), 기준지진동(Basis Ground Motion, Ss), 최대산정지진(Maximum Calculated Earthquake) 등이 있는데, 국가별로 내진설계 입력이나 적용에 차이가 있을 수 있으므로 대략적인 비교로만 참고해야 한다. 이 연구에서는 국가별로 사용하는 용어로 기술하되, 결론적으로는 설계기준지진이란 용어로 단순화해서 비교하였고, 설계기준지진 수준은 지진동

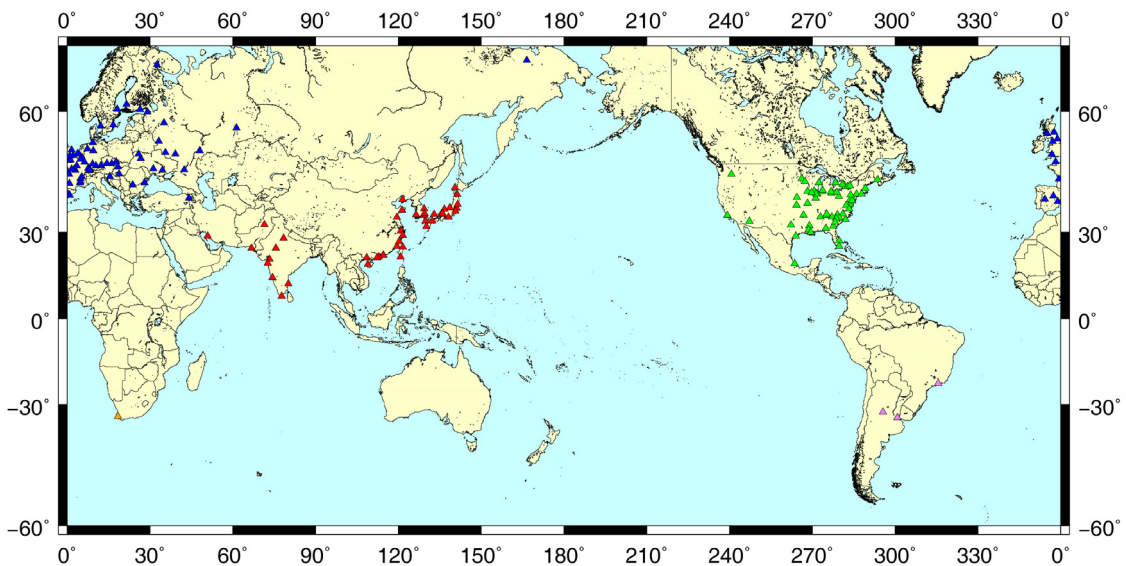
의 수평성분을 기준으로 하였다. 설계기준지진에서 지진은 지진원(seismic source)이 아닌 지진동(ground motion)을 의미한다. 국가별로 다른 지진재해도에 대해 어떤 수준의 설계기준지진을 고려하여 원자력발전소 부지의 지진안전성을 확보하고 있는지 확인하기 위해, 현재 폐쇄되거나 건설 중인 원자력발전소를 제외하고 운영 중인 원자력발전소에 한하여 5대륙(6대륙에서 오세아니아는 제외)으로 구분하여 기술하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 아시아

국제원자력기구(International Atomic Energy Agency)에 따르면, 아시아에서 원자력발전소를 운영하는 국가는 중국, 인도, 이란, 일본, 한국, 파키스탄, 대만 등 7개국인데, 원자력발전소 부지는 48개(그림 1), 운영 중인 원자력발전소는 142기, 약 118,710 MW의 발전소 순용량(net capacity)을 출력하고 있다. 이 절에서는 중국, 인도, 일본, 한국의 사례를 살펴보았다.

중국은 현재 14개 부지에서 약 45,200 MW의 발전소 순용량을 갖는 46기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020).



**Fig. 1.** Location of nuclear power plant sites in operation (blue triangle). The red, blue, green, orange and violet triangles represent nuclear power plant sites located in Asia, Europe, Africa, North America, and South America, respectively.

중국은 부지의 지진안전성 평가에 3가지 주요 문제를 해결해야 했는데, 이는 부지주변의 활성단층 확인, 부지의 설계기준지진 매개변수 결정 및 지진으로 인한 기타 잠재적인 지질재해에 대한 평가이다. 부지주변의 활성단층 유무는 선택한 부지의 적합성을 결정하는 요소이다. 부지의 설계기준지진 매개변수는 안전정지지진 수준의 침두지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)와 응답스펙트럼을 포함한다. 지진재해도 분석에는 결정론적 방법과 확률론적 방법의 계산 결과를 포괄적으로 고려해야 한다. 안전정지지진 수준의 지진동 매개변수를 결정할 때, 결정론적 방법은 지체구조적 지진 및 분산형 지진의 영향을 계산한 결과를 제공하고, 확률론적 방법은  $10^4$ /년을 초과하는 연간확률을 제공하는데, 지진수준-2(SL-2)의 설계기준지진은 수평 침두지반가속도로 0.15 g 이상이다(Xiaojun *et al.*, 2013). 한편 부지는 지진활동도가 높은 지역 및 위험한 지표파열 구역을 피해야 한다. 지진동이 0.3 g 이상 예상되는 지역은 부지에 적합하지 않으므로 지진활동도가 낮은 지역을 선택해야 한다. 신규 발전소의 경우, 설계기준지진은 0.3 g 이상이어야 한다(Cuohan, 2015). 정리하면, 중국 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지의 위치에 따라 0.15 g ~ 0.3 g 수준이고, 기본적으로 미국 원자력규제위원회(United States Nuclear Regulatory Commission)의 규제지침(Regulatory Guide) 1.60 (United States Nuclear Regulatory Commission, 2014) 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다.

인도는 현재 7개 부지에서 약 6,300 MW의 발전소 운용량을 갖는 22기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 안전정지지진은 침두지반가속도, 응답스펙트럼 형상 및 호환 시간이력을 고려하여 지정되는데, 이와 관련하여 지진지체구조 조사 수행, 내진설계기준 도출 및 지진안전성 측면에서 부지의 적합성을 확인하기 위한 지침이 마련되어 있다. 해당 조사는 광역(반경 300 km), 중간(반경 50 km), 국지(반경 5 km) 및 부지(발전소 경계 이내)의 최대지진자료 등 4개 척도의 지질 및 지진조사를 기반으로 한다. 이를 통한 설계기준지진은 최소 0.15 g에서 최대 0.3 g 수준으로 설정되었다. 부지의 지진안전성 재평가는 확률론적 지진재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)에 의해 수행되고 있다(Atomic Energy Regulatory

Board, 2011). 정리하면, 인도 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 따라 0.1 g ~ 0.3 g 수준이다.

일본은 현재 16개 부지에서 약 36,500 MW의 발전소 운용량을 갖는 38기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 일본에서 내진설계에 중요한 시설은, 부지 주변의 지질·지질구조 및 지진활동성 등의 지진 및 지진공학 측면에서 시설의 공용기간 중에 지극히 드물기는 하지만 발생가능성이 있어 해당 시설에 큰 영향을 줄 우려가 있으면 가정하는 것이 바람직한 지진동에 대해, 시설의 안전기능이 손상되는 일이 없도록 설계되어야 한다. 해당 시설은 지진에 의해 발생 가능성이 있는 방사선에 의한 환경영향의 관점에서 내진설계의 범주별로 적절하다고 생각되는 설계용 지진력에 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 하는데, 이러한 지진동을 기준지진동  $S_s$ 라고 한다(Nuclear Regulation Authority, 2006). 기준지진동은 '부지별로 진원을 특정하여 책정하는 지진동'과 '진원을 특정하지 않고 책정하는 지진동'이 있다. 부지에 따라  $S_s$ 는 0.459 g (Higashidori 부지) ~ 2.347 g (Kashiwazaki Kariwa 부지)로 설정되었으며, 고유 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다(Seismological Society of Japan, 2015). 주기적안전성평가(Periodic Safety Review)에는 확률론적 지진재해도 분석을 포함하는데, 이전 결과와 변함이 없다면 평가를 실시하지 않으며, 적어도 5년 마다 한 번씩 평가를 반복하고 있다. 정리하면, 일본 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 따라 0.459 g ~ 2.347 g 수준이고, 일본 고유 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다.

한국은 현재 6개 부지에서 약 23,800 MW의 발전소 운용량을 갖는 25기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 안전정지지진은 한반도 및 주변지역의 지질 및 지진 특성과 과거에 발생했던 지진자료를 종합적으로 고려하여 결정된다. 부지반경 320 km 이내 지역에 대한 지질 및 지진조사를 통하여 지진발생구조와 지진지체구조를 결정한다. 지진발생구조란, 지진을 발생시킬 수 있는 것으로 확인된 지질구조이며, 일관성 있는 지질, 지진, 지구물리자료 등이 통합되어 확인되어야 한다. 지진지체구조란, 지진발생과 연관된 특정 지질구조가 확인되지는 않으나, 지진이 분산적으로 발생하는 지역이며, 통상적으로 지진발생

가능성이 동일한 지역으로 가정한다. 안전정지지진이 결정된 후에는 이에 대한 적합성 확인 및 불확실성 영향 평가를 위해 확률론적 지진재해도 분석을 수행한다. 부지의 안전정지지진은 0.2 g (신형 경수로는 0.3 g)로 결정되었다(Choi, 2014). 정리하면, 한국 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 따라 0.2 g~0.3 g 수준이고, 기본적으로 미국 원자력규제위원회 규제지침 1.60 (United States Nuclear Regulatory Commission, 2014) 설계응답스펙트럼과 캐나다 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다.

## 2.2 유럽

유럽에서 원자력발전소를 운영하는 국가는 아르메니아, 벨기에, 불가리아, 체코, 핀란드, 프랑스, 독일, 헝가리, 네델란드, 루마니아, 러시아, 슬로바키아, 슬로베니아, 스페인, 스웨덴, 스위스, 우크라이나, 영국 등 18개국인데, 원자력발전소 부지는 71개(그림 1), 운영 중인 원자력발전소는 182기, 약 160,370 MW의 발전소 순용량을 출력하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 이 절에서는 프랑스, 러시아, 우크라이나, 영국의 사례를 살펴보았다.

프랑스는 현재 19개 부지에서 약 28,500 MW의 발전소 순용량을 갖는 58기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 설계기준지진에 대한 결정론적 접근방식은 시설 설계에서 고려해야 할 지진재해도를 정의하는데 사용된다. 최대역사가가능지진(Maximum Historically Probable Earthquake)은 해당 부지에 대해 가장 높은 진도를 산출하는 지진 또는 지진들이다. 지진은 응답스펙트럼으로 기술되고, 역사지진의 규모와 진원깊이를 결정할 필요가 있다. 각 최대역사가가능지진에 대해 부지의 Medvedev-Sponheuer-Karnik 진도 측면에서 설계기준지진은 단순한 관계를 통해 추론된다. 설계기준지진 진도는 통상적으로 최대역사가가능지진 진도에 I을 더하는데, Medvedev-Sponheuer-Karnik 진도의 I 증가는 전체적으로 운동 매개변수의 2배 증가에 해당되도록 결정한다. 응답스펙트럼은 일반적으로 최대역사가가능지진에 리히터(Richter) 규모로 0.5를 더한 크기를 채택하여 연는다(French Nuclear Safety Authority, 2011). 기본적으로 발전소가 위치한 지역에서 지난 1,000년 동안 발생한 최대지진보다 더 큰 지진에 견딜 수 있도록 설계할 것을 요구

한다. 한편, 최근 국가 차원에서 수행된 확률론적 지진재해도 분석은 SIGMA (Seismic Ground Motion Assessment) 프로젝트의 결과물로 2016년에 프랑스 남동부에 대해 수행되었다(Nuclear Energy Agency, 2019). 정리하면, 프랑스 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 설치된 원자력발전소의 특성에 따라 0.1 g~0.3 g 수준이고, 설계응답스펙트럼은 기존 가속도기록의 평활화된 평균, 미국 원자력규제위원회 규제지침 1.60 (United States Nuclear Regulatory Commission, 2014) 등을 사용한다.

러시아는 현재 10개 부지에서 약 28,500 MW의 발전소 순용량을 갖는 37기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 지진학적으로 각 부지는 설계기준지진과 안전정지지진으로 특징지어진다. 러시아에서는 1,000년에 1번 부지에서 발생하는 빈도의 최대진도를 설계기준지진이라고 하고, 10,000년에 1번 부지에서 발생하는 빈도의 최대진도를 안전정지지진이라고 한다(Russian Federation, 2012). 즉, 러시아의 안전정지지진이 이 연구에서 다루고 있는 설계기준지진에 해당된다고 볼 수 있다. 부지의 안전정지지진은 Medvedev-Sponheuer-Karnik-64 기준으로 V~VIII이며, 지반가속도 수준으로 0.026 g~0.25 g이다(Russian Federation, 2012). 정리하면, 러시아 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 따라 0.026 g~0.25 g 수준이고, 러시아 고유 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다.

우크라이나는 현재 4개 부지에서 약 13,100 MW의 발전소 순용량을 갖는 14기의 원자력발전소를 운영하고 있다. 우크라이나에서 운영 중인 모든 부지 선정과 설계는 1970년대 중반에 시행된 규제요건을 충족시키기 위해 수행되었다. 이후 국내외 경험 및 국제원자력기구 권고사항을 고려하여 규제체계를 개선하고 다수의 새로운 규제를 시행하였다. 특히, 2가지 수준의 지진(설계지진과 최대산정지진)이 도입되었다(State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2011). 설계 문서에 따르면 우크라이나의 운영 중 부지의 최대산정지진은  $1 \times 10^{-4}$ 를 초과할 확률을 가진 Medvedev-Sponheuer-Karnik-64 진도에 따른 VI의 진도 및 침투지반가속도 0.05 g이며, 부지고유 토사지반 조건에 따라 가속도기록을 부지 침투지반가속도 측면에서 수정한다. 국제원자력기구 권고사항 및 현행 국제관행에 따라 추가 계측지진조사를 실시

하였는데, South Ukraine 부지의 경우 침두지반가속도 0.093 g의 30% 공학적 여유를 둔 0.12 g이 승인되었다(State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2011). 정리하면, 우크라이나 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 따라 0.05~0.12 g이며, 우크라이나 고유 설계응답스펙트럼 형상을 사용한다.

영국은 현재 7개 부지에서 약 8,900 MW의 발전소 순용량을 갖는 15기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 영국 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 연간 초과빈도가  $10^{-4}$ 인 사건을 목표로 한다. 영국의 지진재해도 수준은 상대적으로 낮기 때문에, 발전소에 대한 지진요건은 1980년 이후에야 확립되었다. 현재 운영 중인 발전소가 있는 모든 부지의 지진재해도를 도출하기 위해 사용된 방법론은 지진재해업무단(Seismic Hazard Working Party)이라고 불리는 전문가 패널에 의해 개발되었다. 발전소 부지의 주기적안전성 평가는 모든 부지의 설계기준지진에 대한 침두지반가속도를 제공하는데, 부지의 설계기준지진은 0.13~0.25 g이다(European Nuclear Safety Regulators Group, 2012). 2015년에 Hinkley Point 부지 신규호기에 대한 확률론적 지진재해도 분석이 수행되었으나 공개되지 않았으며, 2016년에 Sizewell 부지 신규호기에 대한 확률론적 지진재해도 분석이 수행중이었다(Nuclear Energy Agency, 2019). 정리하면, 영국 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 따라 0.13 g~0.25 g이며, 영국 고유 설계응답스펙트럼 형상을 사용한다.

### 2.3 아프리카

아프리카에서 유일하게 원자력발전소를 운영하는 국가는 남아프리카공화국 1개국이며, Koeberg 원자력발전소 부지 1개(그림 1), 운영 중인 원자력발전소는 2기, 약 1,860 MW의 발전소 순용량을 출력하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). Koeberg 원자력발전소는 지진에 특별히 견딜 수 있도록 설계된 최초의 원자력발전소 중 하나이다. 원자로는 1970년대 중반 지진연구를 통해 진원거리 10 km에서 규모 7, 영주기가속도 0.3 g에 견딜 수 있도록 설계되었다. Cape Town 지역에서 기록된 가장 큰 지진은 1809년 Jan Biesjes Kraal에서

발생한 규모 6.5의 지진이었다(National Nuclear Regulator, 2012). 정리하면, 남아프리카공화국 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 0.3 g이다.

### 2.4 북아메리카

북아메리카에서 원자력발전소를 운영하는 국가는 캐나다, 멕시코, 미국 등 3개국이며, 원자력발전소 부지는 62개(그림 1), 운영 중인 원자력발전소는 116기, 총 112,000 MW의 발전소 순용량을 출력하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020).

캐나다는 현재 4개 부지에서 약 13,600 MW의 발전소 순용량을 갖는 19기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 캐나다는 확률론적 그리고 결정론적 설계기준지진 평가 접근방식을 사용한다. 확률론적 접근방식은 지진발생 구역의 형태로 광역 지진활동을 이용하며, 주요 지진의 강진동 기록뿐만 아니라 재해에 주로 기여하는 지진규모, 진앙거리 및 기타 매개변수를 고려한다. 예상 평균 지진동 매개변수의 변동성 조사와 부지주변의 활성 또는 잠재적인 활성 지질구조에 대한 주요 지진 가능성을 포함한다(Nuclear Energy Agency, 2008). 2015년에 캐나다 국가 건물코드를 위한 5차 지진재해도 지도가 발행되었다(Nuclear Energy Agency, 2019). 확률론적 접근방식이 충분한 신뢰성을 제공하지 못하는 일부 상황에서 추가 여유를 포함하기 위해, 결정론적 접근방식을 활용할 수 있다. 지진활동도 모델 및/또는 감쇄관계가 불확실하고 부지인근에서의 주요 지진 가능성이 광역 지진모델에서 설명되지 않는 경우, 이 접근방식을 사용한다(Nuclear Energy Agency, 2008). 정리하면, 캐나다 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 0.3 g이며, 토사지반 및 암반지반 조건의 2가지 캐나다 고유 설계응답스펙트럼이 있고, 토사지반의 경우 스펙트럼 증폭계수에 따라 제시된다.

멕시코는 현재 1개 부지에서 약 1,600 MW의 발전소 순용량을 갖는 2기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). Laguna Verde 부지의 설계기준지진의 유효성을 확인하기 위해 설계기준지진의 최대가속도 평가를 업데이트하였다. 모든 경우에 원래의 설계응답스펙트럼은 설계기준지진 검토 및 업데이트 수행의 일부로 추정된 응답스펙트럼 가속도를 포괄하는 것으로 확

인되었다. 따라서 설계기준지진보다 낮은 값인 침두 지반가속도 0.24 g을 얻어 부지의 설계기준지진이 유효하다고 결론지었다. 부지의 설계기준지진은 0.26 g이다(United Mexican States, 2016). 정리하면, 멕시코 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 0.26 g이고, 기본적으로 미국 원자력규제위원회 규제지침 1.60 (United States Nuclear Regulatory Commission, 2014) 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다.

미국은 현재 57개 부지에서 약 96,800 MW의 발전소 순용량을 갖는 95기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 운영 중 발전소는 역사지진목록과 국지 지질조사의 부지고유 정보로 예상 지진동을 결정한다. 발전소 설계자들은 부지근처의 지진원을 조사했으며, 표본에서 나온 가장 큰 지진을 이용하여 지진동을 알아낸다. 이러한 결정론적 접근방식은 모든 지진원과 지진유형이 부지에 어떤 영향을 미칠 수 있는지를 조사하는 확률론적 분석으로 대체되었다. 이 접근방식은 특정기간 동안 지정된 지진동이 얼마나 될 가능성이 있는지를 추정한다. 현재 미국 원자력규제위원회는 신규 발전소의 지진재해와 내진설계 한계를 설정하기 위해 확률론적 및 성능기반 접근방식을 사용하도록 하고 있다. 미국 중동부(Central and Eastern United States)는 일반적으로 미국 서부와 대조적으로 활성단층이 거의 없는 낮은-중간 지진활동도 지역이다. 그렇더라도 1811~1812년 3개 주요 지진(일반적으로 사용되는 리히터 규모 7~7.7)이 미국 중동부의 상당 지역을 뒤흔들었다. 이 지진은 Missouri 주의 New Madrid 근처에서 발생하였다. 1886년에도 큰 지진(리히터 규모 약 7)이 South Carolina 주의 Charleston 근처에서 발생하였다. 이 지진은 광범위한 피해를 입혔고, 미국 동부 대부분 지역에서 감지되었다. 이러한 역사적 사건들에 대한 지식은 발전소 설계와 분석에서 고려되었다. 미국은 정기적으로 지진원 및 지진동 모델에 대한 새로운 정보를 검토하였고, 이러한 업데이트를 분석한 결과 미국 중동부의 일부 발전소에 대한 지진재해도 추정값이 약간 증가한 것으로 나타났다. 또한 미국은 발전소 인허가 이외의 건물 코드 적용에 사용되는 미국 중동부에 대한 최근 미국 지질조사국(United States Geological Survey)의 지진재해도 추정값을 검토하고 평가하였다. 현재 미국 중동부의 원자력발전소 부지에서 지

진이 발생할 가능성은 설계 및 이전 평가에서 예상한 것보다 약간 더 높을 수 있다는 것을 알 수 있었다(United States Nuclear Regulatory Commission, 2010). 정리하면, 미국 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 따라 0.1 g~0.75 g 수준이고, 부지에 따라 다양한 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다(United States Nuclear Regulatory Commission, 2010; Reuters, 2011).

## 2.5 남아메리카

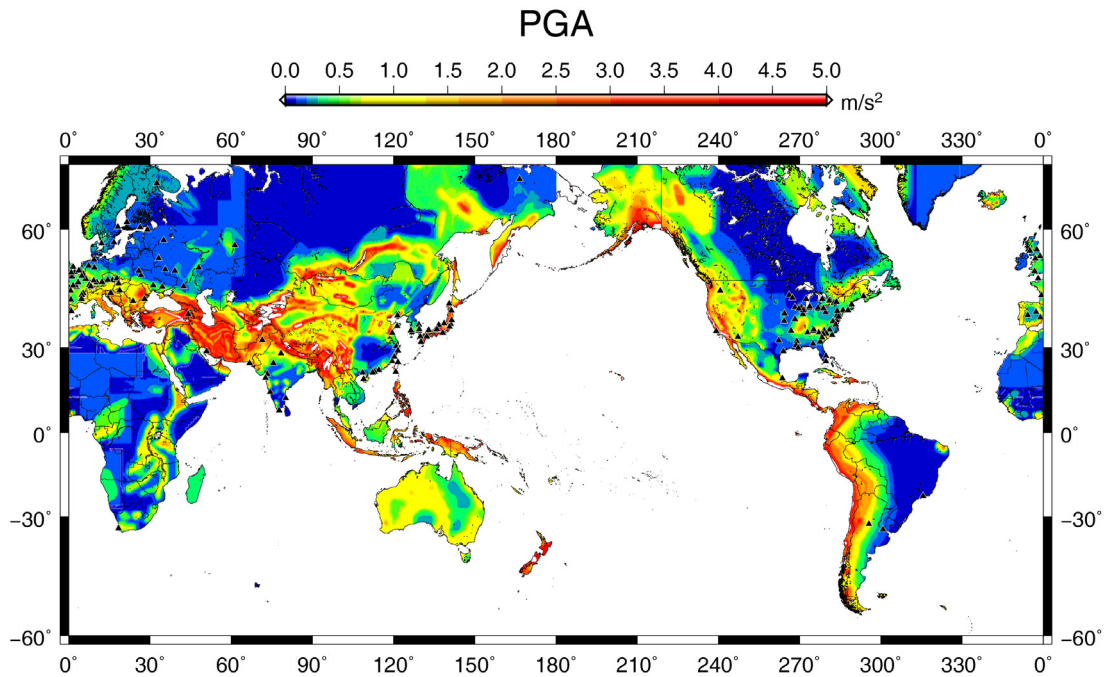
남아메리카에서 원자력발전소를 운영하는 국가는 아르헨티나, 브라질 등 2개국이며, 원자력발전소 부지는 3개, 운영 중인 원자력발전소는 5기, 약 3,500 MW의 발전소 순용량을 출력하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020).

아르헨티나는 현재 2개 부지에서 약 1,600 MW의 발전소 순용량을 갖는 3기의 원자력발전소를 운영하고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). Atucha 부지는 낮은 지진활동도 지역으로, Atucha 1호기 본래 설계기준지진은 예상되는 최대 가속도 0.05 g을 기반으로 하여, 최대수평가속도 0.15 g 및 최대수직가속도 0.075 g으로 설계되었다. 이후, Atucha 2호기 건설에서 결정론적 접근방식에 의한 부지고유 분석을 통해 Atucha 부지의 침두지반가속도는 0.1 g에 해당한다고 결론을 내렸는데, 지진원은 리히터 규모 5.5의 지진으로 부지에서 동쪽으로 20 km 떨어진 Parana 단층에서 발생한 것으로 추정하였다(Autoridad Regulatoria Nuclear, 2012). Embalse 부지의 본래 설계기준지진은 PGA 0.15 g으로 설계되었으며 설계응답스펙트럼은 Housner 유형의 응답스펙트럼이다. 부지의 특성을 고려하도록 지반-구조물 상호작용이 수행되었다. 그러나 해당 지역의 지진활동도는 발전소 설계와 건설 중에 예상된 것보다 높았음이 밝혀졌다. 1983년 D'Appolonia는 보다 최신화되고 포괄적인 지질 및 지진정보를 사용하여 부지의 지진재해에 대한 결정론적 평가를 수행하였으며, 침두지반가속도 0.26 g을 획득하였다. 이 값은 같은 해에 수행된 확률론적 지진재해도 분석에서 약 7,000년의 재래주기와 관련 있다고 판단하였다(Autoridad Regulatoria Nuclear, 2012). 정리하면, 아르헨티나 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 부지에 따라 0.1 g~0.26 g 수준이고, 기본

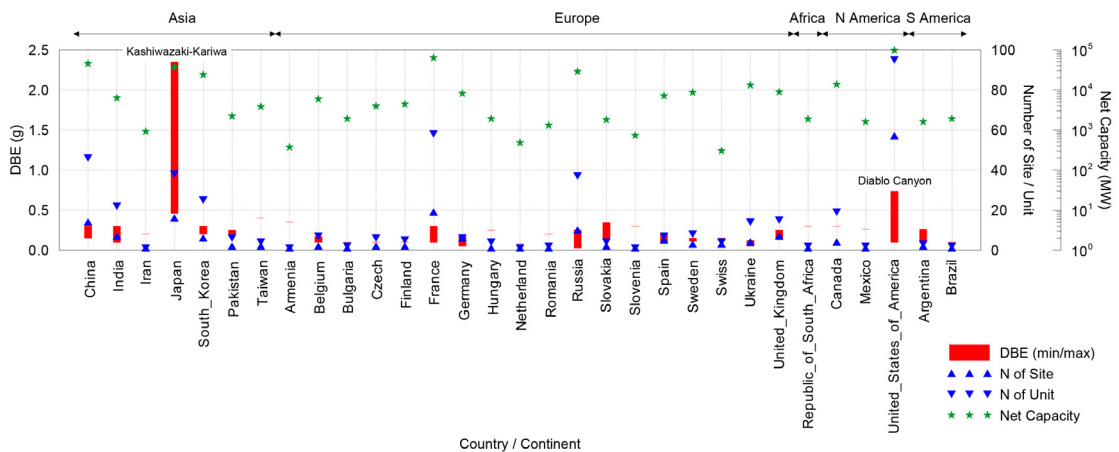
적으로 미국 원자력규제위원회 규제지침 1.60 (United States Nuclear Regulatory Commission, 2014) 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다.

브라질은 현재 1개 부지에서 약 1,900 MW의 발전소 순용량을 갖는 2기의 원자력발전소를 운영하

고 있다(International Atomic Energy Agency, 2020). 브라질은 지진활동도가 낮은 나라이며, 부지의 설계기준지진은 노두암반에서 수평 침투지반가속도 0.1 g으로 설정되었다. 결정론적으로 채택된 설계기준지진은 확률론적 지진재해도 분석에 의해 재확인되었다



**Fig. 2.** Worldwide nuclear power plant sites in operation (black triangle with white contour) and global seismic hazard map (Giardini *et al.*, 1999). The hazard map depicts seismic hazard as PGA with 10% probability of exceedance in 50 years, corresponding to return period of 475 years.



**Fig. 3.** Comparison of design basis earthquake (DBE) level (red box), number of site (blue triangle) and unit (blue inverted triangle), and net capacity (green star) between countries by continent.

**Table 1.** Design basis earthquake level for nuclear power plant sites in operation by continent.

Continent	Country	Minimum (g)	Maximum (g)	Reference
Asia	China	0.15	0.3	Xiaojun <i>et al.</i> (2013), Cuohan (2015)
	India	0.1	0.3	Atomic Energy Regulatory Board (2011)
	Iran	0.2	0.2	State Atomic Energy Corporation (2020)
	Japan	0.459	2.347	Seismological Society of Japan (2015)
	South Korea	0.2	0.3	Choi (2014)
	Pakistan	0.2	0.25	Pakistan Nuclear Regulatory Authority (2016)
	Taiwan	0.4	0.4	Taiwan Regulatory Body (2013)
Europe	Armenia	0.35	0.35	Armenian Nuclear Regulatory Authority (2015)
	Belgium	0.1	0.17	Federal Agency for Nuclear Control (2011, 2019)
	Bulgaria	0.1	0.1	Nuclear Regulatory Agency (2011)
	Czech	0.1	0.1	State Office for Nuclear Safety (2011)
	Finland	0.1	0.1	Radiation and Nuclear Safety Authority (2011)
	France	0.1	0.3	Nuclear Energy Agency (2019)
	Germany	0.051	0.173	Federal Ministry for the Environment, Nature conservation and nuclear safety (2011)
	Hungary	0.25	0.25	Hungarian Atomic Energy Authority (2011)
	Netherland	0.08	0.08	Ministry of Economic Affairs, Agriculture & Innovation (2011)
	Romania	0.2	0.2	National Commission for Nuclear Activities Control (2011)
	Russia	0.026	0.25	Russian Federation (2012)
	Slovakia	0.143	0.344	Nuclear Regulatory Authority of the Slovak Republic (2011)
	Slovenia	0.3	0.3	Slovenian Nuclear Safety Administration (2011)
	Spain	0.1	0.2	Consejo De Seguridad Nuclear (2011)
	Sweden	0.11	0.15	Swedish Radiation Safety Authority (2011)
	Swiss	0.12	0.15	Swiss Federal Nuclear Inspectorate (2011)
	Ukraine	0.05	0.12	State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine (2011)
United Kingdom	0.13	0.25	European Nuclear Safety Regulators Group (2012), Nuclear Energy Agency (2019)	
Africa	Republic of South Africa	0.3	0.3	National Nuclear Regulator (2012)
North America	Canada	0.3	0.3	Nuclear Energy Agency (2008, 2019)
	Mexico	0.26	0.26	United Mexican States (2016)
	United States of America	0.1	0.75	United States Nuclear Regulatory Commission (2010), Reuters (2011)
South America	Argentina	0.1	0.26	Autoridad Regulatoria Nuclear (2012)
	Brazil	0.1	0.1	Government of the Federal Republic of Brazil (2016)



(Government of the Federal Republic of Brazil, 2016). 정리하면, 브라질 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 0.1 g 수준이고, 브라질 고유 설계응답스펙트럼의 형상을 사용한다.

### 3. 결론

원자력발전소 부지의 설계기준지진은 일반적으로 그 지역의 지진활동도에 따라 결정된다. 이 연구에서는 현재 폐쇄되거나 건설 중인 원자력발전소를 제외하고, 국가별 운영 중인 원자력발전소 부지의 설계기준지진 수준과 평가내용을 대륙별로 확인하였다. 대상은 대륙별로 아시아 7개국, 유럽 18개국, 아프리카 1개국, 북아메리카 3개국, 남아메리카 2개국의 총 31개국인데, 대부분 북반구에 위치하고 있다. 섭입대 인근에 위치하여 큰 규모의 지진이 자주 발생하는 아시아 대륙의 일본이나 북아메리카 대륙의 미국 서부에서 운영되는 원자력발전소 부지의 설계기준지진 수준이 높았는데, 일본 Kashiwazaki Kariwa 1~4호기 부지의 설계기준지진은 2.347 g, 미국 Diablo Canyon 1, 2호기 부지의 설계기준지진은 0.75 g에 이른다. 우리나라와 지진활동이 유사한 북아메리카 대륙의 미국 중동부나 유럽 대륙 등에서 운영되는 원자력발전소 부지의 설계기준지진 수준은 국내 원자력발전소와 유사하거나 높은 것으로 확인되었다 (그림 2, 3; 표 1).

국내 원자력발전소 부지의 설계기준지진은 규정에 따라 미국 연방법을 준용하여 부지 반경 320 km 지역의 지질 및 지진특성 자료에 대한 분석, 그리고 부지 반경 8 km 지역에 대한 정밀 지질조사를 통해 원자력시설 부지에서 예상되는 최대지진동을 고려하여 결정하고 있다. 한편, 설계기준지진 평가와 관련하여 미국은 1997년 이후 건설되는 신규원전에 대해 설계기준지진에 내재된 불확실성을 확률론적 지진재해도 분석이나 민감도 분석을 통해 기술하도록 하는 등, 확률론적 방법에 의한 설계기준지진 결정을 허용하였으며, 이후 확률론적 지진재해도 분석에 기반한 성능기반 부지고유 설계기준지진을 결정하도록 하였다. 유럽 및 다른 원자력발전소 국가들도 설계기준지진 평가에 확률론적 방법을 적용하거나 보완하도록 하고 있다. 따라서 국내 원자력발전소도 이러한 국제적인 추세에 적절히 대비하고 설계기준

지진 평가 기술기준을 위한 국내 기술을 고도화할 필요가 있다.

### 감사의 글

이 연구는 한국원자력안전재단이 출원한 원자력 안전연구사업(과제번호 1705010-0521-SB130)의 지원을 받아 한국원자력안전기술원에서 수행하였습니다. 원고의 개선을 위해 세심한 조언을 해주신 익명의 심사위원들께 감사드립니다.

### REFERENCES

Armenian Nuclear Regulatory Authority, 2015, National report : Stress test for Armenian nuclear power plant.

Atomic Energy Regulatory Board, 2011, Report of AERB committee to review safety of Indian nuclear power plants against external events of natural origin.

Autoridad Regulatoria Nuclear, 2012, Argentine national report : Second CNS extraordinary meeting.

Choi, H., 2014, Seismic safety of the nuclear power plant sites in Korea. Earthquake Focus, 5, 56-59 (in Korean).

Consejo De Seguridad Nuclear, 2011, Final report : Stress tests carried out by the Spanish nuclear power plants.

Cuohan, C., 2015, Safety enhancement of npps in China after Fukushima accident, 2015 Nuclear Safety Conference in Brussel, <http://www.ensreg.eu/sites/default/files/attachments/1.4-chai.pdf> (June 29, 2015).

European Nuclear Safety Regulators Group, 2012, Peer review country report of United Kingdom - Stress tests performed on European nuclear power plants.

Federal Agency for Nuclear Control, 2011, National report for nuclear power plants : Belgian stress tests.

Federal Agency for Nuclear Control, 2019, National progress report on the stress tests of nuclear power plants : Belgian stress tests.

Federal Ministry for the Environment, Nature conservation and nuclear safety, 2011, National report of Germany : EU stress test.

French Nuclear Safety Authority, 2011, National Report - Complementary safety assessments of the French nuclear power plants (European "stress tests").

Giardini, D., Grunthal, G., Shedlock, K.M. and Zhang, P., 1999, The GSHAP Global Seismic Hazard Map. Annals of Geophysics, 42, <https://doi.org/10.4401/ag-3784>.

Government of the Federal Republic of Brazil, 2016, Seventh National Report of Brazil for the Nuclear Safety Convention.

- Hungarian Atomic Energy Authority, 2011, National report of Hungary : Targeted safety re-assessment of Paks nuclear power plant.
- International Atomic Energy Agency, 2020, Country nuclear power profiles, <http://cnpp.iaea.org/pages/index.htm> (October, 2020).
- Katona, T.J., 2017, Issues of the seismic safety of nuclear power plants. Earthquake - Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, Taher Zouaghi, IntechOpen, <https://doi.org/10.5772/65853>.
- Ministry of Economic Affairs, Agriculture & Innovation, 2011, Netherland's national report : Post-Fukushima stress test for the Borssele nuclear power plant.
- National Commission for Nuclear Activities Control, 2011, National report of Romania : Implementation of the stress tests.
- National Nuclear Regulator, 2012, The national report of South Africa for the second extraordinary meeting of the convention for nuclear safety.
- Nuclear Energy Agency, 2008, Differences in approach between nuclear and conventional seismic standards with regard to hazard definition, NEA/CSNI/R(2007)17.
- Nuclear Energy Agency, 2019, Comparison of probabilistic seismic hazard analysis of nuclear power plants in areas with different levels of seismic activity, NEA/CSNI/R(2019)1.
- Nuclear Regulation Authority, 2006, Regulatory guide for reviewing seismic design of nuclear power reactor facilities.
- Nuclear Regulatory Agency, 2011, National Report of Bulgaria : European stress tests for nuclear power plants.
- Nuclear Regulatory Authority of the Slovak Republic, 2011, National report : The stress tests for nuclear power plants in Slovakia.
- Pakistan Nuclear Regulatory Authority, 2016, Convention on nuclear safety : Report by the Government of Islamic Republic of Pakistan for the seventh review meeting, 2017.
- Radiation and Nuclear Safety Authority, 2011, National Report : European stress tests for nuclear power plants.
- Reuters, 2011, FACTBOX - U.S. nuclear plant quake risk, <https://www.reuters.com/article/us-nuclear-quake-idAFN1E77T21G20110902> (September 3, 2011).
- Russian Federation, 2012, National report - The second extraordinary meeting of the contracting parties to the convention on nuclear safety.
- Seismological Society of Japan, 2015, Monograph - Nuclear Power Plants in Japan and Earth Science, 3, 92-95 (in Japanese).
- Slovenian Nuclear Safety Administration, 2011, Slovenian National Report : Nuclear stress tests.
- State Atomic Energy Corporation, 2020, Safety of NPP, <http://www.rusatom-overseas.com/nuclear-energy/safety-of-npp> (October, 2020).
- State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2011, National Report - Stress test results.
- State Office for Nuclear Safety, 2011, Stress tests : NPP Dukovany and NPP Temelin.
- Swedish Radiation Safety Authority, 2011, The Swedish national report : European stress tests for nuclear power plants.
- Swiss Federal Nuclear Inspectorate, 2011, Eu stress test - Swiss national Report.
- Taiwan Regulatory Body, 2013, Taiwan stress test - National report for nuclear Power Plants.
- United Mexican States, 2016, National Report - To meet the requirements of the convention on nuclear safety 2013-2015.
- United States Nuclear Regulatory Commission, 2010, Results of Safety/Risk Assessment of Generic Issue 199 - Implications of updated probabilistic seismic hazard estimates in Central and Eastern United States on existing plants. Appendix B.
- United States Nuclear Regulatory Commission, 2014, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, Regulatory Guide 1.60 Rev. 2.
- United States Nuclear Regulatory Commission, 2018, Background on seismic reviews at U.S. nuclear power plants, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fs-seismic-issues.html> (June 13, 2018).
- Xiaojun, L., Qiumei, H. and Chunlin, H., 2013, The issues related to determination of site specific design ground motion for nuclear power plants in China. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 15, 75-82 (in Chinese with English abstract).

---

Received : August 13, 2021

Revised : October 8, 2021

Accepted : October 20, 2021